第9卷 第2期
1988年5月
动 物 学 研 究
ZOOLOGICAL RESEARCH
Vol. 9, No. 2
May., 1988

害虫种群经济阈值的概念及其数字模型

丁岩钦

（中国科学院动物研究所 北京）

关键词：害虫种群，经济阈值概念，经济阈值数字模型，经济为害水平

害虫种群的经济阈值是害虫管理系统中的一个主要组成成份，因为害虫的控制必须讲求经济效益，决定采取防治措施时，首先需要考虑防治的挽回收益是否大于防治成本，亦就是要求防治后的挽回收益价值一定要大于至少等于防治费用。因此决定某种害虫的防治与否和如何防治，并不单纯取决于虫情，而主要取决于虫害所造成的经济损失、防治效果、防治费用以及最终的产值挽回收益。这样，在采取害虫控制决策措施时，如果没有经济阈值为依据，则常会浪费人力物力，引起环境污染，害虫产生抗性，或过多杀死天敌以及后期害虫的猖獗。亦即只有对于害虫的经济阈值进行了解，才能真正地更经济更合理地对害虫进行管理。所以近十几年来对害虫经济阈值的研究课题，受到国内外的极大重视。

一、经济阈值的概念

什么是经济阈值？其定义在各文献中是不同的，Stern（1959）认为经济阈值就是决定应用控制措施时的害虫种群密度，以阻止到达经济为害水平时的害虫种群密度。而经济为害水平是造成作物经济损失最低的害虫种群密度，在此水平上，作物对于害虫的为害不再能忍耐。因此在此水平或低于此水平将是开始采取防治措施的理想时机。Headley（1971）提出的经济阈值定义为：作物收益与防治费用之间相差最大时的害虫种群水平，即Max(B－C)，B表示挽回收益，C表示防治费用。Pitre（1979）认为关于阈值概念有两个水平需要考虑，一是经济为害水平，它涉及到造成经济为害的最低害虫种群数量，因此它是基础。而经济为害是害虫为害损失与所用人工控制费用两者相抵销时的损失量。另一是经济阈值，它涉及到害虫种群密度，在此密度时防治措施将要开始使用，以阻止害虫达到经济为害水平。Ruesink（1976）认为经济为害水平是造成经济为害的最低的害虫种群密度，而经济阈值是略低于经济为害水平的害虫种群密度，在此密

本文1986年10月30日收到，1987年8月11日收到修改稿。

度时，必须采取某些防治措施，以阻止害虫达到经济为害水平。

上述论点，可以归纳为：（1）应用经济学边际分析原理观点，Headley 提出经济阈值应是作物挽回的边际收益与边际费用相等时的种群密度。（2）Stern，Pitre，Ruesink均认为经济为害水平是造成作物经济为害最低的种群密度，并且该水平应高于（至少等于）经济阈值的种群水平。而经济为害水平有的包括了防治费用，有的则未包括，因此对经济为害水平概念的理解是不同的。关于经济阈值虽均认为是决定应用控制时的种群密度，但如何确定经济阈值的水平，其依据是什么，均无明确的叙述。

作者认为经济阈值的确定，应根据三个条件：

1.害虫为害对作物产量关系的反应类型　害虫为害对作物产量关系的反应类型，一般又可分为三类：

（1）敏感型反应类型：害虫为害与产量损失的关系呈线性关系，即作物的产量随害虫为害水平的增加而呈线性下降。例如马铃薯叶蝉对大豆为害关系(Ogunlana 1974)。美国棉铃虫对甜甘蔗的为害关系(Stern 1959)。如图(1a)。作物在多数的种类中对害虫的为害均有一定的耐害能力，因此属于线性反应的类型只在一定的为害范围内如此。

（2）耐害型反应类型：作物对于害虫为害的耐害性反应，通常呈S型，即作物对于一定数量的害虫为害在达到经济为害水平之前，具有一定的耐害性或补偿性，因此在此范围内，害虫为害不引起产量损失，或产量损失无经济意义。而超过此害虫密度时，作物产量即随虫口密度的增加而迅速下降。直到较低的下限水平达到为止，形成S型。见图（1b）。多数害虫对作物的为害均属于此类型。

（3）超补偿型反应类型：本类型反应与耐害型反应不同之处，只是在害虫低为害水平的范围内，作物受害后，由于部分叶面积减少，或部分生殖器官脱落，刺激了作物的超补偿作用，反而使产量增加。在超过经济为害水平时，超补偿反应与耐害型反应的规律相同。见图（1C）。如棉铃虫对棉株蕾期的为害（盛承发等，1983）。

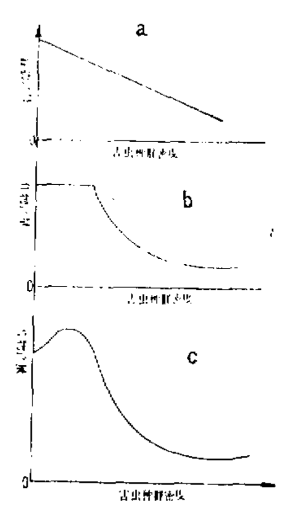


图1　作物产量与害虫种群密度的关系

2.害虫管理的经济效益　根据经济学原理，防治害虫必须讲求经济效益，即防治后的挽回收益必须大于防治成本，至少应等于防治成本。最好使挽回边际收益与边际费用相等，见图2。

3.害虫管理的生态效应　防治害虫，挽回收益，收到经济效益，这是其中一个方面，由于防治对策不同，防治害虫亦可杀死天敌，破坏生态平衡，引起后期害虫猖獗，或引起环境污染，这是防治害虫引起的另一个方面，即生态效应。因此经济效益可以认为是当前的效益，局部的效益，而生态效应是长远的或较长远的效益，是整体的效益。在害虫管理中不能只顾前者而忽视后者，这就要求当前与长远相结合，局部与整体相结合。

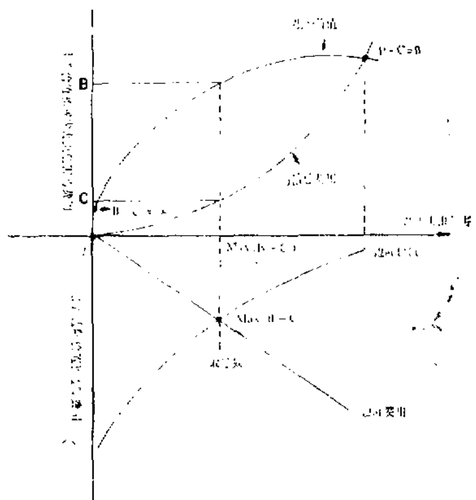


图 2　生产价值、减少害虫危害所需要的费用和害虫为害关系(Headley 1982)

根据以上分析，作者认为阈值概念应包括两个水平：（1）经济为害水平；它涉及害虫不同种群密度对作物产值的影响，主要明确在哪个种群密度上时，产值受害的损失即有经济上的意义。经济为害水平系属于纯生物过程，而不涉及防治费用等因素。根据前述，作物产量与害虫不同种群密度的关系，呈现三种反应类型，即图（3）所示。图（3B）中N_1即为害虫经济为害水平，在N_1以前的害虫种群密度对产量影响无经济意义。只有种群超过N_1时，产值才随种群的增加而下降。图(3A)的经济为害水平很低，N_1接近1，这是因为只要有害虫为害即可引起经济损失。而图(3C)中说明在N_1以前，作物的产值系随害虫种群密度增加而增加，而只有当超过N_1时产值才随种群增加而下降。这样，N_1即为害虫对作物造成经济为害时的最低种群水平。

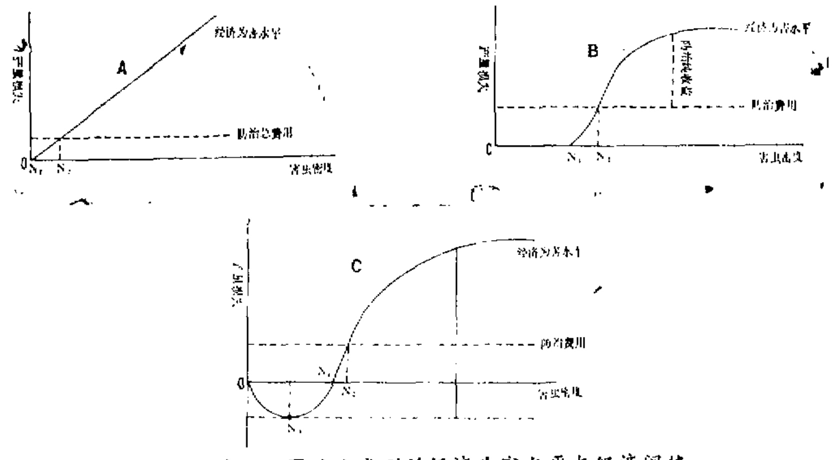


图 3　作物不同反应类型的经济为害水平与经济阈值

（2）经济阈值：系指开始使用控制措施时的害虫种群密度，它系根据经济效益、生态效应结合害虫经济为害水平，综合权衡下，估出的害虫种群密度。

为分析简便起见，假设生态效应为零，即暂不考虑生态效应，而只考虑防治费用，这样图（3）中的N_2均为经济阈值，而在图（3 C）中的情况，N_1与N_2均可作为经济阈值，如果为了保持作物遭到一定数量的害虫为害而增产，亦可将经济为害水平N_1或小于N_1的某一数值作为经济阈值，若为了某些生态效应的关系，需要提高经济阈值指标，则亦可用N_2作为经济阈值。这样，经济阈值的取值范围，既可能大于害虫经济为害水平，亦可能小于或等于经济为害水平。并且经济为害水平系明确不同虫口密度下为害与作物经济损失关系，尤其系确定最低虫口的经济为害水平。而经济阈值则系通过上述三个约束条件下的估值。

二、经济阈值的数学模型

确定经济阈值，通常认为是比较复杂的，因为它既涉及害虫与作物的生物学问题，亦涉及经济学与生态学问题，这样在考虑经济阈值的数学模型时，经济阈值就是害虫经济为害水平，不同年龄结构对作物的为害力，作物的耐害水平以及控制费用等的函数。

经济阈值的模型，自1970年以来陆续在生产中应用的，较全面的模型，主要有：

Chiang H. C. (1979)的模型

$$ET=\frac{CC\times CF}{EC\times y\times p\times y_R\times S_C}$$

ET—经济阈值　CC—防治费用　EC—防治效果　y—产量

y_R—每虫对产量降低百分率　p—产品价值　S_C—存活率

CF—临界因子（或生态效应）

该方程中有几点假设值得商榷：（1）y_R系以每虫对产量的损失率来估计，即产量损失与虫口密度呈线性关系，根据图（3）知，种群对产量的为害损失一般系不呈线性关系。（2）防治效果(EC)系随不同密度而有不同，因此将其作为常数是不适宜的。

Ruesink (1976, 1982) 对苜蓿绿夜蛾（*Plathypena scabra*）提出的数学模型，系以下列假设为依据：（1）植物的叶子被食后不再产生新叶。（2）食叶百分率与产量损失之间的关系只与大豆生长阶段有关。并且这些关系均假设为已知。（3）如果进行防治，所有为害均可避免。根据上述假设，提出经济阈值的数学模型为

$$p_k=\frac{1}{2(100\beta_kF)}\left(-\alpha_k L_k\pm\sqrt{\alpha_k^2L_k^2-4(100\beta_kF)\frac{-C_2L_k^2}{C_1NF}}\right)$$

或简化为 $p_k=\frac{0.005L_k}{\beta_kF}\left(-\alpha_k+\sqrt{\alpha_k^2+400\frac{C_2\beta_k}{C_1N}}\right)$

p_k— k阶段的害虫种群密度（即经济阈值）

L_k— k阶段大豆叶片的总面积　F—食害面积率

N—当为害为零时，单位面积产量

C_1—每蒲尔大豆价格　　C_2—防治费用

α_k，β_k—常数

该模型（1）对于种群为害程度与种群密度关系应用了线性关系，即抛弃了种群的密度制约因素，而事实上即使害虫猖獗发生年，亦很少为害损失呈零。（2）该模型仅考虑了当前的经济效益，而忽视了生态效应。

作者根据经济学的原理，即控制害虫的目的从经济学上可归纳为求

$$N[y(s)]C[y(s)]=C_1(s)\rho(s) \tag{1}$$

N—为害为零时的作物产量　　C—作物产品的价格　　y—害虫为害产量损失率

C_1—防治费用　　S—防治对策

ρ—防治后对环境或后期害虫等产生的影响，即生态效应指数($\rho\geqslant1$)

在（1）式中的左端$N[y(s)]$项说明产量损失是害虫为害损失的函数，$C[y(s)]$项说明产品价格是害虫为害损失的函数，而$N[y(s)]C[y(s)]$项又说明防治害虫后挽回产值的大小又是防治对策的函数，（1）式右端$C_1(s)\rho(s)$项说明防治对策对防治费用与防治后的引起的生态效应呈函数关系。

若只考虑一种防治对策，则

$$N[y]C[y]=C_1\rho \tag{1'}$$

设　$B=N[y]C[y]=NCy_t$　　　(2)

B—产量损失，亦即实际挽回收益值

y_t—t阶段时，由于害虫为害造成的产量损失率

若产量损失率(y)与害虫为害程度(D)（如食叶面积、落蕾数、落铃数等）呈指数曲线关系时，如图(4)则可用下式表示：

$$y_t=a\ exp(B'D_t) \tag{3}$$

若y_t与D_t呈线性关系时，则$y_t=A+ED_t$　　(4)

其中a，B'，A，E为常数，其生物学意义，B'，E均为害虫为害对产量损失率的作用强度，a，A为当害虫的为害程度为零时的产量损失率，因为产量损失除该害虫的作用外，还有其它因子的影响。因此a，A，包含着所有其它因子的作用。

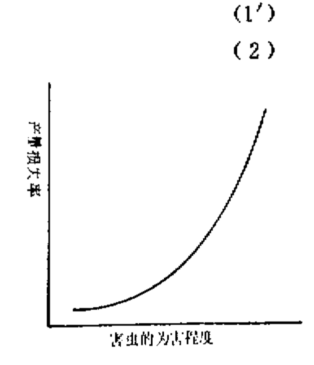


图4　产量损失率与为害程度关系

现在分别代（3），（4）式于（2）式

$$B=CN(ae^{B'Dt}) \tag{5}$$

$$B=CN(A+ED_t) \tag{6}$$

由于害虫对作物的为害程度(D)与害虫种群密度(p)有密切关系，而害虫对作物的为害，由于受其自身食量限制，以及密度制约作用的影响，因此两者之间并不呈线性关系，而是当超过一定的密度时，其为害程度由于受到种内竞争、种间竞争的影响，则随种群密度上升而受阻，这样D与P两者间的关系常呈负加速曲线或S型曲线关系，图

（5，a，b），上述两种类型可用下式表示

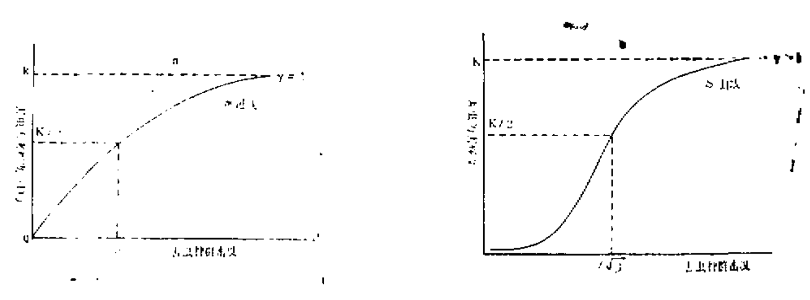


图5 害虫种群密度与害虫为害程度关系的两种表现型

$$D_t=\frac{Kp_t^r}{\beta_t+p_t^r} \qquad (7)$$

K，β_t，r 均为常数，其生物学的意义：K表示害虫最大为害量。β_t表示 t 阶段时作物对害虫为害的耐害程度，当D与p关系呈负加速曲线类型时，β_t向左移说明作物对害虫为害的忍受性弱，而β_t向右移说明作物的忍受性强。图（6）可以看出这种关系。当A，B两种作物同时受同一种害虫为害时，它们达到$K/2$为害程度时的害虫种群密度表现显著不同。A种作物的β_t较B种作物的β_t值显著向左，这说明A种作物的忍受性较B种作物为弱。即它遭到少量害虫害口为害时即可达到$K/2$，而B种作物则需较多虫口为害才能达到同样的为害程度。图（6）r 表示害虫对作物为害的反应曲线类型。当 $r=1$

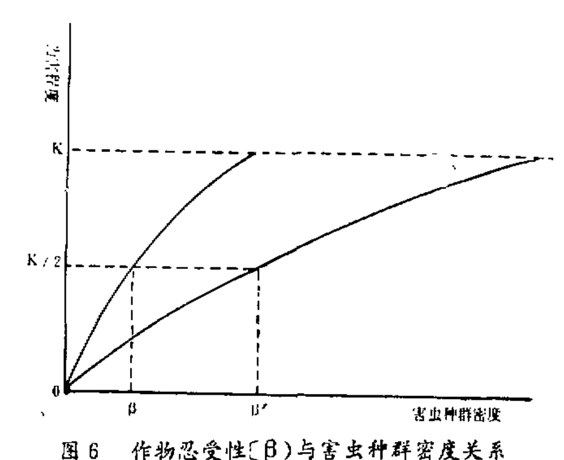


图6 作物忍受性（β）与害虫种群密度关系

时为负加速曲线，当 $r>1$ 时，为S型曲线。代（7）式于（5）式和（6）式

$$B=CNa\,exp\left[B'\left(\frac{Kp_t^r}{\beta_t+p_t^r}\right)\right] \qquad (8)$$

$$B = CN\left[A + E\left(\frac{Kp_t^{\tau}}{\beta_t + p_t^{\tau}}\right)\right] \tag{9}$$

根据（1′）式知，$B = C_1\rho \quad (\rho\geqslant 1)$ （10）

代（8）式于（10）式

$$C_1\rho = CNa\times p\left[B'\left(\frac{Kp_t^{\tau}}{\beta_t + p_t^{\tau}}\right)\right] \tag{11}$$

由（11）式解 p_t^{τ} 值，即为该种害虫的经济阈值，亦即开始使用控制措施时的害虫种群密度

$$p_t^{\tau} = \frac{\beta_t l_n\left(\frac{C_1\rho}{CNa}\right)}{KB' - l_n\left(\frac{C_1\rho}{CNa}\right)} \tag{12}$$

若代（9）式于（10）式

$$C_1\rho = CN\left[A + E\frac{Kp_t^{\tau}}{\beta_t + p_t^{\tau}}\right)\right] \tag{13}$$

$$p_t^{\tau} = \beta_t\left(\frac{C_1\rho - ACN}{CNEK - C_1\rho + ACN}\right) \tag{13}$$

当 $\rho = 1$ 时，即不考虑生态效应，当 $\rho > 1$ 时，考虑了生态效应。ρ 值大说明生态效应影响大，则经济阈值亦高。根据实例计算，ρ 值的取值范围主要在1—2之间。

三、小结与讨论

1.本文通过对经济阈值概念的文献综述，以及作物受害后的反应类型分析，结合害虫管理的经济效益与生态效益，提出了经济阈值的定义，即阈值概念包括两个水平，其一是经济为害水平，它是涉及害虫不同种群密度对作物产值的影响，主要明确害虫对作物造成经济为害时的最低种群水平，而与防治费用无关。它系属于生物过程。另一是经济阈值水平，它是开始使用控制措施时的害虫种群密度。经济阈值系根据经济效益，生态效益，结合经济为害水平综合权衡下估出的害虫种群密度。经济阈值的取值范围，既可能大于经济为害水平，亦可能小于或等于经济为害水平。

作者根据上述经济阈值给出的定义，结合经济学与生态学原理，提出了适用于害虫多种为害形式的经济阈值的数学模型。即

$$p_t^{\tau} = \frac{\beta_t ln\left(\frac{C_1\rho}{CNa}\right)}{KB' - ln\,(C_1\rho/CNa)}$$

$$p_t^{\tau} = \beta_t\left(\frac{C_1\rho - ACN}{CNEK - C_1\rho + ACN}\right)$$

上述两个模型，既考虑了经济效益与生态效益，并对模型中的参数均给出了其生物学上的意义。

2.模型中，防治费用(C_1)亦可用防治对策、防治效果等的函数表示。同样，由于ρ值取决于防治后对后期害虫种群动态与防治关系，或对环境的影响等因素，因此对于ρ值的确定，根据作者通过多种害虫数据计算的体会，可用经济学的流动贴现法，或累计评分法。而ρ值的取值范围多在1—2之间。

3.本模型未包括作物超补偿作用的行为，对于提出既能包括超补偿作用，又能使其所有参数均具有生物学意义的数学模型，尚需今后进一步研究。

参 考 文 献

盛承发等 1983 华北棉区药剂防治二代棉铃虫经济生态学效益分析 生态学报 3：35—46

Chiang, H. C. 1979 A general model of the economic threshold level of pest populations. FAO Plant Protection Bull. 27 No. 3

Headley, J. C. 1971 Control strategies for the future. Natl. Acad. Sci. Wash. D. C. P. 100—108

Headley, J. C. 1982 Introduction to pest management. A. Wiley-Interscience Pub. p69—93

Ogunlana, M. O. *et al.*; 1974 Pest status of the potato leafhopper on soybeans. J. Econ. Entomol. 67 :200—202

Pitre, H. N. *et al.*; 1979 Economic threshold and sampling of Heliothis species. S. C. S. B. No. 231 P12—30

Ruesink, W. G. 1976 Status of the systems approach to pest management. Ann. Rev. Entomol. 21:27 —44

Ruesink, W. G. 1982 Introduction to pest management. A. Wiley-Interscience Pub. P353—376

Stern, V. M. *et al.*; 1959 The integrated control concept. Hilgardia 29:81—101

Stern, V. M. 1973 Economic thresholds. Ann. Rev. Entomol. 18:259—80

THE CONCEPT ON THE ECONOMIC THRESHOLD OF PEST POPULATION AND IT'S MATHEMATICAL MODEL

Ding Yanqin

(Institute of Zoology, Academia Sinica, Beijing)

The economic threshold concept of pest population consists of two levels. One of them is the economic injury level that refers to economic damage to the crop yield under the different density of pest population, especially to the lowest populationdensity. Based on the responses of insect damagecrop yield, three major types appeared which are termed susceptive, tolerant and overcompensatory (Fig. 3). Therefore this level is belonged to biogical process and independence with control cost. The second one is the economic threshold level *that is the density of pest population at which control measures should* be initiated. The economic threshold level comes from the optimal combination of economic efficiency, ecological efficiency and economic injury level. Thus economic threshold may be higher or lower or equal to the economic injury level.

A mathematical model on the economic threshold of pest management is proposed

$$let\ B = NCY_t \qquad (1)$$

B is the benefits which comes from the value of damage prevented

C is the price of crop product

N is the yield with zero damage

Y_t is the percentage of yeild loss due to pest in t stage

As we knew, the relationship between the percentage of yield loss (Y_t) and damage degree (D_t) caused by the pest usually can be represented as follows

$$Y_t = a\ exp\ (B'D_t) \qquad (2)$$

$$or\quad Y_t = A + ED_t \qquad (3)$$

Substituting equation (2), (3) into equation (1) gives

$$B = CN(a\ e^{B'D_t}) \qquad (4)$$

$$or\quad B = CN(A + ED_t) \qquad (5)$$

a, B', A, E are constant.

Owing to the damage degree (D_t) is closely related with the density of pest population (P_t), the density-dependent factor and the feeding capacity of pest are mainly effective factors to the percentage of damage degree; thus the relation between them is not a linear type, but a curvilinear asymptote or a sigmoidal curve. That can be represented

$$D_t = \frac{KP_t^r}{\beta_t + P_t^r} \quad (6)$$

K, β_t, r are constant. Its biological mean is that K is max. damaged amount caused by pest

β_t is the tolerant degree of crop to pest damage

r represents curvilinear trend; when $r = 1$ it shows a curvilinear ssymptote. When $r > 1$ it shows a sigmoidal curvilinear Substituting equation (6) into equation (4), (5) gets

$$B = CN\ a\ exp\left[B'\left(\frac{KP_t^r}{\beta_t + P_t^r}\right)\right] \quad (7)$$

$$B = CN\left[A + E\frac{XP_t^r}{\beta_t + P_t^r}\right)\right] \quad (8)$$

Based on the definition of economic threshold as given above

$$B = C_1\rho \quad (9)$$

C is the economic efficiency.

ρ is ecological efficiency $\rho \geqslant 1$

Substituting equation (7), (8) into (9)

$$C_1\rho = CNa\ exp\left[B'\left(\frac{XP_t^r}{\beta_t + P_t^r}\right)\right] \quad (10)$$

$$C_1\rho = CN\left[A + E\left(\frac{KP_t^r}{\beta_t + P_t^r}\right)\right] \quad (11)$$

Solving for P_t gives

$$P_t^r = \frac{\beta_t\, ln\left(\frac{C_1P}{CNa}\right)}{KB' - ln\left(\frac{C_1\rho}{CNa}\right)} \quad (12)$$

$$P_t^r = \beta_t\left(\frac{C_1\rho - ACN}{CNEK - C_1\rho + ACN}\right) \quad (13)$$

Key words: Pest population, Concept of economic threshold, mathematical models of economic threshold, Ecnomic injury level